第 37 卷第 20 期
2017 年 10 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.20
Oct.,2017

DOI: 10.5846/stxb201607271533
胡旭仁, 金斌松, 王文娟, 王子牧, 秦海明.鲢鳙鱼养殖小型水库底栖动物群落季节动态.生态学报,2017,37(20):6875-6883.
Hu X R, Jin B S, Wang W J, Wang Z M, Qin H M.Seasonal dynamics of zoobenthos communities in a small reservoir stocked with silver and bighead carp. Acta Ecologica Sinica,2017,37(20):6875-6883.

鲢鳙鱼养殖小型水库底栖动物群落季节动态

胡旭仁[1], 金斌松[1,2,3], 王文娟[1,2,3], 王子牧[4], 秦海明[1,2,3,*]
1 南昌大学生命科学研究院流域生态学研究所和生命科学学院,南昌 330031
2 南昌大学鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室,南昌 330031
3 江西鄱阳湖湿地生态系统国家定位观测研究站,南昌 330038
4 湖北中扬生态农业有限公司, 安陆 432600

摘要:底栖动物是鱼类重要的天然饵料,评估水体中底栖动物的现存量可以指导渔业生产中鱼类的放养数量。为了探究淡水生态养殖水库中底栖动物群落的季节动态,于 2013 年 4 月、7 月、10 月和 2014 年 1 月对三河水库的底栖动物群落进行了调查分析。研究共采集到 7 个属的底栖动物,隶属于颤蚓科、摇蚊科和蠓科,未采集到软体动物。相对重要性指数 (IRI) 计算结果表明,菱跗摇蚊属 *Clinotanypus* (IRI=7136)、颤蚓属 *Tubifex* (IRI=6734) 和尾鳃蚓属 *Branchiura* (IRI=1384) 是优势类群,分别占总捕获数量的 34.26%、50.38% 和 10.96%。不同季节之间底栖动物的总密度和生物量差异显著 (P<0.05),均为冬季>春季>夏季>秋季。冬季总密度 (4100 个/m^2) 和总生物量 (10.14 g/m^2) 最高,春季 (1446 个/m^2; 1.07 g/m^2) 次之,夏季 (579 个/m^2; 0.66 g/m^2) 较低,秋季 (492 个/m^2; 0.64 g/m^2) 最低。非度量多维尺度分析 (MDS) 和群落相似性分析表明底栖动物群落结构季节差异显著 (P=0.001),2013 年三河水库的底栖动物群落可明显划分为 3 个:春季群落、夏秋季群落和冬季群落。皮尔森相关分析表明,底栖动物总密度与溶氧和营养盐呈正相关关系,与其他水理化因子呈显著负相关关系 (P<0.05)。冗余分析表明,氨氮、盐度、pH 和浊度是三河水库底栖动物群落季节差异的显著影响因子(P<0.05),总氮对底栖动物群落的季节差异具有边缘显著影响 (P=0.08)。

关键词:底栖动物;密度;生物量;季节动态;三河水库

Seasonal dynamics of zoobenthos communities in a small reservoir stocked with silver and bighead carp

HU Xuren[1], JIN Binsong[1,2,3], WANG Wenjuan[1,2,3], WANG Zimu[4], QIN Haiming[1,2,3,*]
1 *Center for Watershed Ecology, Institute of Life Science and School of Life Science, Nanchang* 330031, *China*
2 *Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang* 330031, *China*
3 *National Ecosystem Research Station of Jiangxi Poyang Lake Wetland, Nanchang* 330038, *China*
4 *Hubei Zhongyang Ecological Agriculture Co., Ltd., Anlu* 432600, *China*

Abstract: Zoobenthos is an important natural food resource for fishes. Assessing the standing crop of zoobenthos in water bodies can provide the guideline for stocking fishes in fishery production. To explore the seasonal dynamics of zoobenthic communities in freshwater aquaculture reservoirs, investigations were conducted in April, July, and October 2013, and January 2014, to determine the composition of zoobenthic communities in the Sanhe Reservoir. The relationships between zoobenthic communities and environmental factors (water temperature, pH, turbidity, salinity, dissolved oxygen, chlorophyll a, NH_4^+-N, NO_3^--N, total nitrogen, and total phosphorus) were analyzed. In this study, seven genera of

基金项目:湖北省科技计划研究与开发项目(2013BBA049); 江西省教育厅青年基金项目(GJJ13018); 南昌大学鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室开放基金(13006457)
收稿日期:2016-07-27; **网络出版日期**:2017-06-01
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: qinhaiming@ ncu.edu.cn

zoobenthos belonging to Tubificidae, Chironomidae, and Ceratopogouidae were detected. The results of the index of relative importance (IRI) showed that *Clinotanypus* (IRI = 7136), *Tubifex* (IRI = 6734), and *Branchiura* (IRI = 1384) were dominant groups, which accounted for 34.26%, 50.38%, and 10.96% of total abundance, respectively. The total density and biomass of zoobenthos significantly varied among seasons ($P < 0.05$), and both were highest in winter (4100 ind./m^2, 10.14 g/m^2), followed by spring (1446 ind./m^2, 1.07 g/m^2), and summer (579 ind./m^2, 0.66 g/m^2), and were lowest in autumn (492 ind./m^2, 0.64 g/m^2, respectively). The zoobenthic communities in the Sanhe Reservoir mostly consisted of oligochaetes and chironomid larvae, which exhibited characteristics of higher density and lower biomass. *Tubifex* was the most dominant group in spring. *Tubifex* and *Branchiura* were dominant groups in summer and autumn. *Chironomidae* and *Tubifex* were dominant groups in winter. Significant differences in zoobenthic communities among seasons were found by non-metric multi-dimensional scaling (MDS) and similarity analysis ($P = 0.001$). Zoobenthic communities in the Sanhe Reservoir showed three temporal communities, i.e., spring community, summer-autumn community, and winter community. Pearson correlation analysis indicated that total density of zoobenthos was positively correlated with dissolved oxygen and nutrients. However, the total density of zoobenthos had significant negative correlations with water temperature, pH, salinity, turbidity, and chlorophyll-a content ($P < 0.05$). Redundancy analysis suggested that NH_4^+-N, salinity, pH, and turbidity were important factors, which had significant effects on seasonal variation of zoobenthic communities ($P < 0.05$). Total nitrogen concentration had marginally significant effects on seasonal differences of zoobenthic communities ($P=0.08$). In the pelagic zones of the small reservoir stocked with higher density of fishes, organism deposition resulted in a narrower habitat for the distribution of molluscs, such as shellfish and snails. Therefore, the composition of benthic fauna was dominated by oligochaetes and insect larvae. The differences in predator pressure on zoobenthos caused by fishes in different seasons had direct effects on the seasonal dynamics of zoobenthic communities in the fish stocked reservoir. In addition, the distribution of some benthic feeding fish, such as *Pelteobagrus fulvidraco*, might lead to the decrease in zoobenthos density in the reservoir.

Key Words: benthic fauna; density; biomass; seasonal dynamic; Sanhe Reservoir

底栖动物主要由寡毛类、软体动物和水生昆虫三大类组成,是水域生态系统的重要组成部分。它们取食浮游生物、底栖藻类和有机碎屑等,同时被肉食鱼类和鸟类所取食,对其它水生动物的生存和繁殖具有直接影响[1-2],是水生态系统物质循环和能量流动的枢纽之一。由于底栖动物是底栖性鱼类和一些杂食性鱼类主要的天然饵料[3-4],因此研究水体中底栖动物的群落结构对渔业生产具有指导意义,通过对底栖动物现存量的调查可确定鱼类的放养潜力。

水库、湖泊和流域的环境特征会随季节发生相应的改变[5],这些环境因子的变化对大型底栖动物的生长、繁殖和种群演替具有直接影响[6-7],并最终导致底栖动物群落发生变化[8]。研究表明,水体营养盐含量对底栖动物的分布具有明显的影响,其中总磷对底栖动物分布的影响较大[9-10]。此外,鱼类的捕食对底栖动物群落也具有直接影响[3]。

本研究选择位于湖北省安陆市的三河水库为研究地点,调查 4 个季节底栖动物的组成、密度和生物量,并测定水理化和营养盐含量,旨在了解进行鲢鳙鱼生态养殖的小型水库中大型底栖动物的群落结构及其季节格局,并进一步探究水环境因子对大型底栖动物群落季节分布差异的影响,以期丰富淡水生态系统的底栖动物群落生态学研究内容,并为中小型水库渔业生态养殖提供科学依据。

1 材料方法

1.1 研究地点

安陆市位于湖北省东北部, 113°10′—113°57′E, 31°04′—31°29′N 之间 (图 1)。气候特征为春秋短、冬

夏长,四季分明,夏季炎热多雨。年平均降水量 1100 mm,年平均气温为 16.0℃,1 月份平均气温为 2.8℃,7 月份平均气温 26.1℃。辖区内有水库 30 余座,是湖北省农牧渔业的重要城市之一。三河水库位于安陆市东北 15 km,面积约 2 km^2,最大水深 6.5 m,是一座以防洪灌溉为主,兼顾渔业养殖等综合利用的小型水库。每年 3—4 月份,水库承包方会向水库中大量投入体重 0.5—0.8 kg 的鲢鳙鱼苗,并于 10 月底开始进行捕捞,至次年 1 月初停止捕鱼活动。

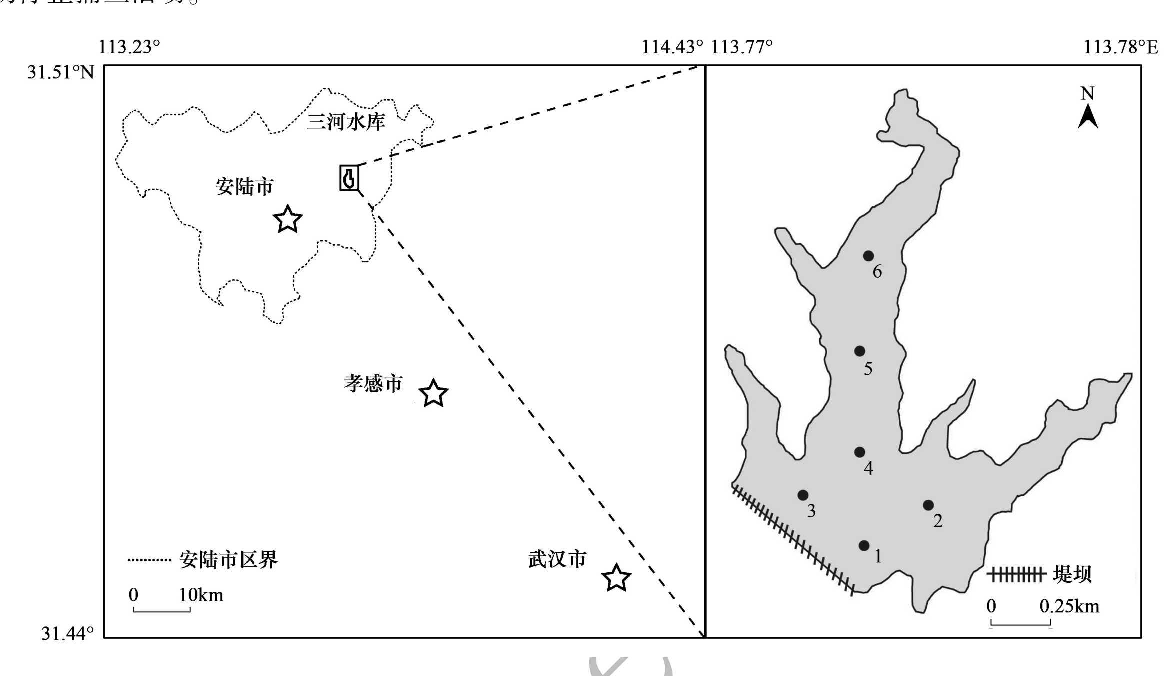


图 1　三河水库底栖动物采样点示意图

Fig.1　Diagram of zoobenthos sampling points in Sanhe Reservoir

1.2　采样时间和方法

2013 年 4 月、7 月、10 月和 2014 年 1 月,在安陆市三河水库设置的 6 个采样点(图 1)进行大型底栖动物定量采集。在每个采样点使用采样面积为 0.04 m^2的彼得森采泥器采集底泥,使用 0.5 mm 孔径的不锈钢网筛过滤收集底栖动物样品,现场使用 4%福尔马林溶液固定保存于 50 mL 塑料标本瓶。实验室内,在解剖镜下鉴定到属[11-12],并统计每一个属的个体数量。使用吸水纸吸干底栖动物标本表面的水分后,用电子天平称量湿重(精确到 0.0001 g)。

1.3　理化指标及营养盐测定

采集底栖动物的同时,使用 YSI6600V2 多参数水质分析仪测定各采样点的水温(WT)、pH 值(pH)、浊度(Tur)、溶氧(DO)、盐度(Sal)和叶绿素 a 浓度(Chl-a)。每个样点采集水样 1000 mL,带回实验室测定营养盐含量,包括氨氮(NH_4^+-N)、硝氮(NO_3^--N)、总氮(TN)、总磷(TP),营养盐测定按照国家标准进行[13-14]。

1.4　数据统计

采用相对重要性指数(IRI)确定底栖动物优势类群,计算公式为:$IRI=(W+N)\times F$[15]。式中 W 为某一类群的生物量占大型底栖动物总生物量的百分比;N 为该类群的密度占大型底栖动物总密度的百分比;F 为该类群出现的频率。

使用 Statistica7.0 软件,对水环境因子、底栖动物密度和生物量进行单因子方差分析(One-way ANOVA)。使用 Primer 5.0 软件,对 4 个季节底栖动物群落进行相似性分析(Analysis of similarities, ANOSIM)和非度量多维尺度分析排序(Non-metric multi-dimensional scaling, MDS)。使用 SPSS 13.0 分析底栖动物数量与水环境因子的相关性,并计算皮尔森相关性系数(Pearson correlation coefficients)。使用 Canoco for Windows 4.5 分析

软件,对底栖动物与水环境因子之间的关系进行对应分析,蒙特卡罗检验(Monte Carlo Test)确定对底栖动物群落具有显著影响的环境因子。P<0.05 表示有显著差异或显著影响,所有数据在进行统计分析前,均进行了 $\log_{10}(x+1)$ 转换。

2 结果

2.1 水环境因子季节特征

三河水库的水环境因子具有显著的季节变化(图 2)。

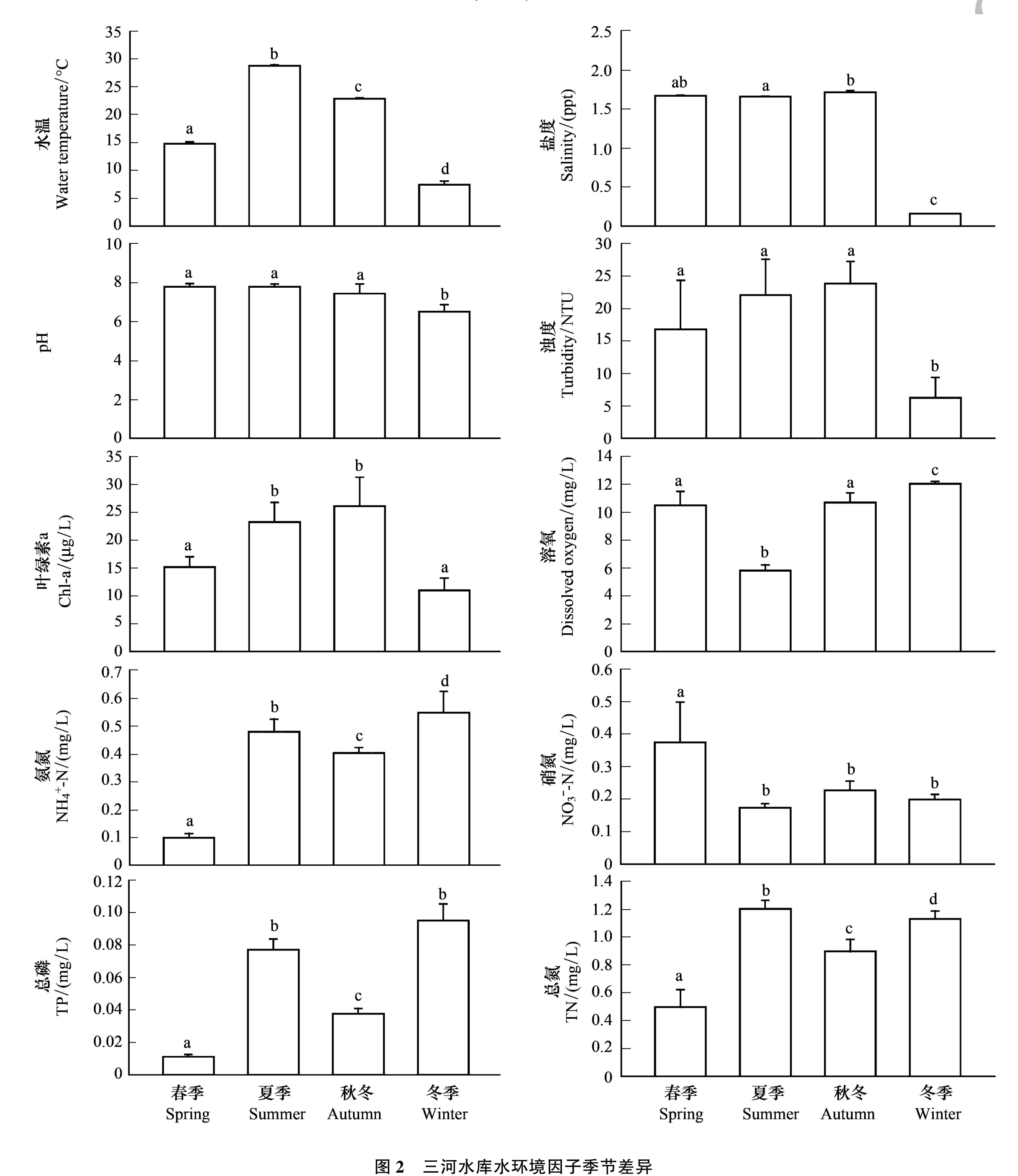


图 2 三河水库水环境因子季节差异

Fig.2 Seasonal differences of environmental factors of Sanhe Reservoir

夏季水温最高,平均温度为 28.82 ℃,冬季最低,为 7.43 ℃。水体溶解氧含量与水温相反,夏季溶氧

(5.85 mg/L) 最低,冬季 (12.08 mg/L) 最高。pH、盐度和浊度季节变化趋势一致,均表现为冬季显著低于其他季节 ($P<0.05$)。秋季叶绿素 a 的含量 (26.2 μg/L) 最高,冬季 (11.02 μg/L) 最低。

三河水库水体中氨氮和硝氮的浓度变化趋势相反,春季到冬季氨氮浓度呈递增趋势,而硝氮呈递减趋势。总氮和总磷浓度的季节变化趋势与氨氮一致,均为春季最低 (0.497 mg/L,0.011 mg/L),夏季升高,秋季降低,冬季再升高。总氮的浓度在夏季最高 (1.203 mg/L),总磷的浓度在冬季最高 (0.095 mg/L)。

2.2 底栖动物种类组成

本次调查共发现寡毛类和水生昆虫 7 类,分别隶属于颤蚓科 Tubificidae、摇蚊科 Chironomidae 和蠓科 Ceratopogouidae 的 7 个属(表 1)。颤蚓属 *Tubifex*、菱跗摇蚊属 *Clinotanypus* 和尾鳃蚓属 *Branchiura* 的相对重要性指数比较高,且分别占总捕获个体数的 50.38%、34.26% 和 10.96%,确定为优势类群。此外,粗腹摇蚊 *Pelopia* 幼虫在 4 个季节均有分布,属常见类群。

表 1　三河水库底栖动物类群组成、捕获数量、相对重要性指数及缩写

Table 1　Group composition, capture number, IRI and abbreviation of zoobenthos in Sanhe Reservoir

类群 Groups	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	相对重要性指数 IRI	缩写 Abbreviation
寡毛类 Oligochaetes						
尾鳃蚓属 *Branchiura*	7	37	29	101	1384	Bra
颤蚓属 *Tubifex*	328	54	42	355	6734	Tub
水生昆虫 Aquatic insects						
羽摇蚊属 *Chironomus*	0	0	0	17	6	Chi
菱跗摇蚊属 *Clinotanypus*	1	20	21	502	7136	Cli
粗腹摇蚊属 *Pelopia*	6	14	13	9	352	Pel
前突摇蚊属 *Procladius*	5	2	3	0	35	Pro
库蠓属 *Culicoides*	0	0	1	0	1	Cul
总数量 Total number	347	127	109	984		

2.3 底栖动物密度和生物量的季节变化

不同季节之间底栖动物总密度差异显著 (表 2),冬季底栖动物总密度显著高于其它 3 个季节 ($P<0.05$),春季次之,并高于夏季和秋季。底栖动物总生物量统计分析表明冬季生物量极显著高于其他 3 个季节 ($P<0.001$) (表 3),秋季底栖动物总密度和生物量均为 4 个季节最低。

表 2　三河水库底栖动物密度 (个/m²)

Table 2　Density (ind./m²) of zoobenthos in Sanhe Reservoir

类群 Groups	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
寡毛类 Oligochaetes				
尾鳃蚓属 *Branchiura*	29±20 a	154±34 b	121±25 b	421±232 b
颤蚓属 *Tubifex*	1367±507 a	275±63 b	213±44 b	1479±629 a
水生昆虫 Aquatic insects				
羽摇蚊属 *Chironomus*	0	0	0	71±71
菱跗摇蚊属 *Clinotanypus*	4±4 a	83±29 b	88±27 b	2092±468 c
粗腹摇蚊属 *Pelopia*	25±16	58±28	54±19	38±24
前突摇蚊属 *Procladius*	21±14	8±5	13±9	0
库蠓属 *Culicoides*	0	0	4±4	0
总密度 Total density	1446±519 a	579±83 ab	492±53 b	4100±1167 c

表 3　三河水库底栖动物生物量 /(g/m^2)

Table 3　Biomass (g/m^2) of zoobenthos in Sanhe Reservoir

类群 Groups	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
寡毛类 Oligochaetes				
尾鳃蚓属 *Branchiura*	0.09±0.08	0.21±0.15	0.20±0.14	0.20±0.07
颤蚓属 *Tubifex*	0.84±0.29 a	0.25±0.06 b	0.19±0.05 b	0.79±0.28 a
水生昆虫 Aquatic insects				
羽摇蚊属 *Chironomus*	0	0	0	0.05±0.05
菱跗摇蚊属 *Clinotanypus*	0.01±0.01 a	0.08±0.03 a	0.08±0.03 a	8.94±3.01 b
粗腹摇蚊属 *Pelopia*	0.04±0.03	0.10±0.04	0.11±0.04	0.17±0.13
前突摇蚊属 *Procladius*	0.08±0.05 a	0.01±0.01 ab	0.01±0.01 ab	0 b
库蠓属 *Culicoides*	0	0	0.01±0.01	0
总生物量 Total biomass	1.07±0.29 a	0.66±0.17 a	0.64±0.13 a	10.14±3.23 b

优势类群颤蚓属动物的密度和生物量均表现为冬季和春季近似,并显著高于夏季和秋季(P<0.05)。菱跗摇蚊属和尾鳃蚓属动物的密度均为冬季最高,夏季和秋季次之,春季最低。菱跗摇蚊属的生物量表现为冬季极显著(P<0.001)高于夏季、秋季和春季,而尾鳃蚓属的生物量在 4 个季节之间无显著差异。

2.4　底栖动物群落季节格局

群落相似性分析(ANOSIM)表明,三河水库底栖动物群落在四个季节之间具有显著差异(R=0.262,P=0.001)。基于底栖动物个体数的非度量多维尺度分析(MDS)表明,2013 年三河水库的底栖动物群落明显划分为 3 个:春季群落、夏秋季群落和冬季群落(图 3)。

2.5　底栖动物与水环境因子的关系

2.5.1　底栖动物与水环境因子相关性分析

皮尔森相关分析显示底栖动物总密度与水温、盐度、pH、浊度和叶绿素 a 含量显著负相关(P<0.05),与溶氧和总磷显著正相关(P<0.05,表 4)。优势类群颤蚓属与水温和叶绿素 a 含量显著负相关,与硝氮显著正相关(P<0.05)。菱跗摇蚊属与溶氧、氨氮和总磷显著正相关(P<0.05),与其它 5 个理化因子显著负相关(P<0.05)。尾鳃蚓属与盐度显著负相关。其它 4 个类群的底栖动物与水环境因子无显著相关关系。

表 4　底栖动物的密度与环境因子的 Pearson 相关性系数

Table 4　Pearson correlation coefficients for the relationship between zoobenthos density and environment factors

类群 Groups	水温 WT	盐度 Sal)	酸碱度 pH	浊度 Tur/(NTU)	叶绿素 a 含量 Chl-a	溶氧 DO	氨氮 NH_4^+-N	硝氮 NO_3^--N	总氮 TN	总磷 TP
尾鳃蚓属 *Branchiura*	−0.241	−0.460*	−0.281	−0.314	−0.312	0.166	0.279	−0.220	0.358	0.393
颤蚓属 *Tubifex*	−0.485*	−0.348	−0.112	−0.207	−0.447*	0.318	−0.204	0.485*	−0.087	0.033
羽摇蚊属 *Chironomus*	−0.257	−0.361	−0.201	−0.277	−0.28	0.194	0.143	−0.0761	0.194	0.216
菱跗摇蚊属 *Clinotanypus*	−0.645*	−0.857*	−0.625*	−0.643*	−0.601*	0.462*	0.425*	−0.233	0.369	0.626*
粗腹摇蚊属 *Pelopia*	0.210	0.074	0.251	0.354	0.270	−0.156	0.189	−0.053	0.209	0.135
前突摇蚊属 *Procladius*	0.086	0.293	0.026	−0.032	−0.057	0.056	−0.341	0.055	−0.359	−0.345
库蠓属 *Culicoides*	0.116	0.121	−0.309	0.204	0.021	0.092	0.021	−0.068	0.029	−0.09
总密度 Total density	−0.620*	−0.692*	−0.417*	−0.481*	−0.589*	0.429*	0.154	0.103	0.201	0.398*

* 表示物种与环境两个变量之间具有显著相关性(P<0.05)

2.5.2　底栖动物与水环境因子冗余分析

对底栖动物个体数量进行除趋势对应分析(DCA),4 个轴梯度长度的最大值为 2.027,小于 3,因此对底栖动物数据和环境因子进行对应分析时选择冗余分析(RDA)。本研究对三河水库的 10 个水环境因子与 7 类底栖动物的个体数进行分析。结果显示:四季均具有较高数量的颤蚓属受水理化因子和营养盐浓度的影响最小,在排序图中分布于原点附近(图 4),另外两个优势类群尾鳃蚓和菱跗摇蚊幼虫分布在第四象限,与氨氮、总氮和溶氧呈正相关关系。蒙特卡罗检验发现,氨氮、盐度、pH 和浊度是对底栖动物分布具有显著影响的环境因子($P<0.05$),总氮是边缘显著影响因子($P=0.08$)。总磷、硝氮及其它水理化因子对底栖动物的分布没有显著影响。

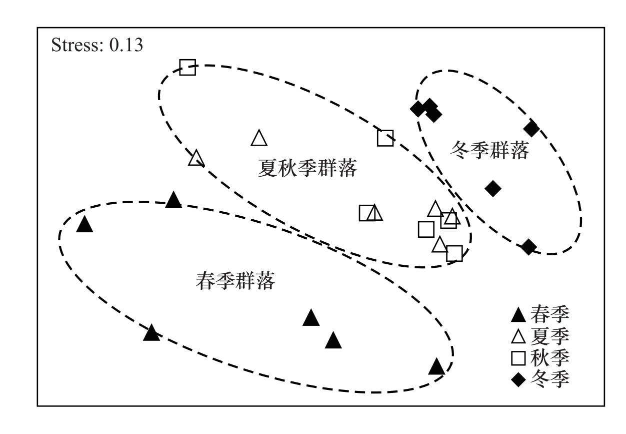




图 3　三河水库底栖动物群落非度量多维尺度排序

Fig.3　Non-metric multi-dimensional scaling (MDS) ordination of zoobenthos communities in Sanhe Reservoir

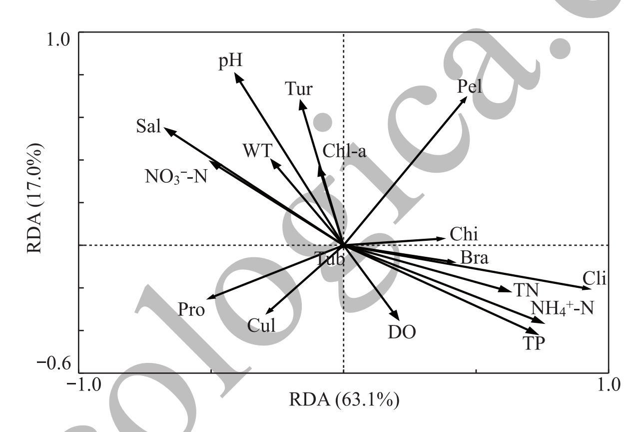


图 4　底栖动物与水环境因子冗余分析排序图

Fig. 4　Ordination diagrams of redundancy analysis between zoobenthos assemblage and water environmental factors

3　讨论

3.1　底栖动物群落组成

有报道指出,湖泊底质和沉水植被分布对软体动物的分布具有较大影响[16],软体动物河蚬在砂质底质中丰度最高,粘土底质中数量最少[17]。螺-草互利理论(Mutualistic theory)[18]认为螺类、附生生物和水生植物之间可形成互利系统,水生植物上的附生藻类可为螺类提供食物。此外,研究还发现水库中软体动物的贫乏是一个较为普遍的现象[19-20],且软体动物分布在沿岸区要多于湖心区[21],马徐发等在湖北道观河水库进行的大型底栖动物研究也仅在沿岸浅水区采集到软体动物[19]。Villnäs 等研究指出水产养殖引起的湖泊有机物沉积会使底栖动物的结构和功能发生改变[22]。在高密度养殖水体中,大型底栖动物的组成简单,多以寡毛类和摇蚊幼虫为主[23]。本研究在三河水库仅采集到寡毛类和水生昆虫两类底栖动物,只在水库沿岸带浅水区和堤坝碎石区发现少量无齿蚌和环棱螺分布。主要原因在于三河水库是一个进行鲢鳙鱼放养为主的小型水库,库底为淤泥质,且采样点均位于敞水区,水深较深,并且无沉水植物分布,因此不适于软体动物贝类和螺类的分布。根据此结果可以推断,在较高密度鱼类放养的水库敞水区,由于有机物沉积和无沉水植物分布,导致适合软体动物螺类和贝类分布的生境比较狭小,因此底栖动物的组成以寡毛类和昆虫幼虫为主。

3.2　底栖动物群落季节动态

三河水库底栖动物群落季节差异显著($P<0.05$),夏季和秋季底栖动物的密度和生物量明显低于春季和冬季,该结果与蒋万祥等[10]和陈立斌等[24]的调查结果相似,而与舒凤月等[25]的报道不尽相同。前两者的研究均报道底栖动物主要由寡毛类和水生昆虫幼虫组成,软体动物对底栖动物的密度和生物量贡献很小。后者的研究也发现底栖动物密度在夏季和秋季较低,春季和冬季较高,而由于软体动物的存在,底栖动物的生物量反而在秋季具有最高值[25]。有报道指出寡毛类的繁殖时期主要在冬季和春季[26],夏季和秋季有些摇蚊幼虫

会发生羽化[27]。此外,某些摇蚊幼虫(如六附器德永摇蚊 *Tokunagayusurika sexpapilosus* 和红裸须摇蚊 *Propsilocerus akamusi*)具有在高温季节下潜、寒冷季节上移的垂直迁移习性[24,28],从而导致夏季和秋季底栖动物密度下降[25]。本研究发现寡毛类和摇蚊幼虫的密度和生物量在冬季均显著高于其他 3 个季节,原因一方面与寡毛类和摇蚊幼虫的生活史差异有关[26],另一方面可能与其生活习性(例如摇蚊幼虫垂直迁移习性)有关[29]。摇蚊幼虫从春季到秋季都能繁殖,但在三河水库中以冬季摇蚊幼虫密度最高,与在其他水库的研究结果不同[30-31],这与水库进行渔业养殖存在必然联系,春季放养鱼苗,对底栖动物的摄食作用,造成夏季和秋季底栖动物密度较低,秋季末进行捕鱼后,水库中鱼类的现存量大大降低,导致冬季鱼类对底栖动物的取食率降低,使得冬季三河水库寡毛类和水生昆虫幼虫密度高。

3.3 环境因子对底栖动物群落的影响

水体理化对底栖动物的群落具有直接影响。有关研究报道寡毛类、软体动物和摇蚊幼虫喜栖息于碱性水体中[8],pH 较高或者较低都会降低底栖动物的繁殖能力、密度和生物量[32]。本研究发现 pH 对三河水库底栖动物的季节分布具有显著影响($P<0.05$)。另有报道指出湖底滞水层的溶解氧水平是影响底栖动物分布的重要因素[33-34],本研究发现三河水库底栖动物密度与水体溶解氧含量具有显著正相关关系。蒋万祥等的研究发现不同季节大型底栖动物群落的显著影响因子具有较大的差异,夏季和秋季水体的电导率对大型底栖动物群落具有主要影响[10],本研究的结果与此一致,皮尔森相关分析表明三河水库水体的盐度与底栖动物的密度显著负相关($P<0.05$)。

水体营养盐含量对底栖动物的密度和分布也具重要影响。相关研究指出湖泊中底栖动物的密度与水体氮、磷含量呈正相关[9],本研究发现三河水库营养盐含量在秋季到冬季有明显的增加趋势,且氨氮和总磷的含量在冬季最高(一是冬季水库垂向的水体交换,使底泥中的氮磷释放进入上层水体[35];二是冬季气温、光照等条件的变化导致初级生产者藻类的密度降低,对营养盐的利用大大减少[36]。),冬季营养盐含量的增加是冬季底栖动物密度和生物量最高的一个重要因素。皮尔森相关分析表明底栖动物密度与总氮、总磷、氨氮和硝氮含量均呈正相关关系,仅总磷含量对其具有显著影响($P<0.05$),这与吕光俊等[9]的报道相一致。

除了水体理化因子和营养盐对底栖动物群落具有影响外,鱼类的捕食对底栖动物群落也具有直接影响[3]。研究期间,水库承包方在 3—4 月向三河水库中投放了大量的鲢鳙鱼苗[37],夏、秋季鱼类新陈代谢旺盛,对底栖动物的捕食压力较大。从渔获物组成来看,三河水库中还有一定数量底栖食性的鱼类(如黄颡鱼等)分布,因此鱼类的取食活动也是导致夏、秋季底栖动物密度显著低于冬季和春季的一个直接原因。

致谢:南昌大学吴勤益、曾泽国和曾泰同学协助野外样品采集,南昌大学曾旻同学帮助鉴定底栖动物样品,湖北中扬生态生态农业有限公司王忠明、南昌大学戎俊研究员帮助写作。

参考文献(References):

[1] 龚志军, 谢平, 阎云君. 底栖动物次级生产力研究的理论与方法. 湖泊科学, 2001, 13(1): 79-88.
[2] 鲍毅新, 葛宝明, 郑祥, 程宏毅. 温州湾天河滩涂大型底栖动物群落分布与季节变化. 动物学报, 2006, 52(1): 45-52.
[3] 彭建华, 刘家寿, 熊邦喜, 俞伏虎, 胡传林. 湖北浮桥河水库底栖动物的群落结构及生物多样性. 湖泊科学, 2002, 14(1): 90-96.
[4] 史键, 赵文, 李赫, 张志鹏, 李文宽, 解涵. 汤河水库和大伙房水库底栖动物群落结构、底层鱼类产量及水质生态评价. 大连海洋大学学报, 2013, 28(4): 383-389.
[5] Bêche L A, Mcelravy E P, Resh V H. Long-term seasonal variation in the biological traits of benthic-macroinvertebrates in two Mediterranean-climate streams in California, U.S.A. Freshwater Biology, 2006, 51(1): 56-75.
[6] de Melo S M, Takeda A M, Monkolski A. Seasonal dynamics of *Callibaetis willineri* (Ephemeroptera, Baetidae) associated with *Eichhornia azurea* (Pontedericeae) in Guaraná Lake of the Upper Paraná River, Brazil. Hydrobiologia, 2002, 470(1): 57-62.
[7] 姜苹红, 周易勇, 纪磊, 肖文娟, 宋春雷. 月湖底泥疏浚后底栖动物群落的恢复及其与环境的关系. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1088-1095.
[8] Iskaros I A, El-Otify A M. Seasonal periodicity of plankton and benthic fauna community structure and diversity in a small North African reservoir.

Water and Environment Journal, 2013, 27(4): 561-574.
[9] 吕光俊, 熊邦喜, 刘敏, 杨学芬, 覃亮, 陈朋, 徐微, 刘俊利. 不同营养类型水库大型底栖动物的群落结构特征及其水质评价. 生态学报, 2009, 29(10): 5339-5349.
[10] 蒋万祥, 贾兴焕, 周淑婵, 李凤清, 唐涛, 蔡庆华. 香溪河大型底栖动物群落结构季节动态. 应用生态学报, 2009, 20(4): 923-928.
[11] Morse J C, Yang L F, Tian L X. Aquatic insect of China useful for monitoring water quantity. Nanjing: Hehai University Press, 1994.
[12] Epler J H. Identification manual for the larval Chironomidae (Diptera) of North and South Carolina. Special Publication SJ2001-SP13. North Carolina Department of Environment and Natural Resources, Raleigh, North Carolina, USA, 2001.
[13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 176-230.
[14] 黄祥飞, 陈伟民, 蔡启铭. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 2000: 45-48.
[15] 韩洁, 张志南, 于子山. 渤海中、南部大型底栖动物的群落结构. 生态学报, 2004, 24(3): 531-537.
[16] 蔡永久, 龚志军, 秦伯强. 太湖软体动物现存量及空间分布格局 (2006-2007 年). 湖泊科学, 2009, 21(5): 713-719.
[17] Schmidlin S, Baur B. Distribution and substrate preference of the invasive clam *Corbicula fluminea* in the river Rhine in the region of Basel (Switzerland, Germany, France). Aquatic Sciences, 2007, 69(1): 153-161.
[18] Thomas J D. Mutualistic interactions in freshwater modular systems with molluscan components. Advances in Ecological Research, 1990, 20: 125-178.
[19] 马徐发, 熊邦喜, 王明学, 王银东, 王卫民, 刘小玲, 徐木生, 张林林, 胡秋生, 王喜波. 湖北道观河水库大型底栖动物的群落结构及物种多样性. 湖泊科学, 2004, 16(1): 49-55.
[20] 池仕运, 彭建华, 万成炎, 邹曦, 李明. 湖北省三道河水库底栖动物的初步研究. 湖泊科学, 2009, 21(5): 705-712.
[21] 熊飞, 李文朝, 潘继征. 抚仙湖底栖软体动物的种类组成与空间分布. 生态学杂志, 2008, 27(1): 122-125.
[22] Villnäs A, Perus J, Bonsdorff E. Structural and functional shifts in zoobenthos induced by organic enrichment—implications for community recovery potential. Journal of Sea Research, 2011, 65(1): 8-18.
[23] 谢祚浑, 周一兵. 镇赉高产塘的底栖动物及其利用率. 大连水产学院学报, 1994, 9(4): 21-31.
[24] 陈立斌, 赵文, 殷守仁, 徐立蒲, 郭凯, 曹欢, 王静波. 官厅水库底栖动物的群落结构及其时空格局. 大连海洋大学学报, 2012, 27(1): 44-52.
[25] 舒凤月, 张承德, 张超, 董龙香, 高冉, 樊喜英. 南四湖大型底栖动物群落结构及水质生物学评价. 生态学杂志, 2014, 33(1): 184-189.
[26] 蔡永久, 刘劲松, 戴小琳, 许浩, 薛庆举, 龚志军. 长荡湖大型底栖动物群落结构及水质生物学评价. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1224-1232.
[27] 徐小雨, 周立志, 朱文中, 许仁鑫, 曹玲亮, 陈锦云, 王勋. 安徽菜子湖大型底栖动物的群落结构特征. 生态学报, 2011, 31(4): 943-953.
[28] Yamagishi H, Fukuhara H. Ecological studies on chironomids in Lake Suwa, I. Population dynamics of two large chironomids, *Chironomus plumosus* L. and *Spaniotoma akamusi* Tokunaga. Oecologia, 1971, 7(4): 309-327.
[29] 郭先武. 武汉南湖三种摇蚊幼虫生物学特性及其种群变动的研究. 湖泊科学, 1995, 7(3): 249-255.
[30] 马秀娟, 沈建忠, 孙金辉, 王海生, 张凯. 天津于桥水库大型底栖动物群落结构及其水质生物学评价. 生态学杂志, 2012, 31(9): 2356-2364.
[31] 孙伟胜, 顾钱洪, 董静, 程清清, 李学军, 张曼. 淮河流域板桥水库大型底栖动物群落结构及水质生物学评价. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2843-2851.
[32] 尤仲杰, 王一农, 丁伟, 徐海军. 几种环境因子对不同发育阶段的泥螺 *Bullacta exarata* 的影响. 浙江水产学院学报, 1994, 13(2): 79-85.
[33] Kitagawa N. A classification of Japanese lakes based on hypolimnetic oxygen and benthonic fauna. Japanese Journal of Limnology, 1978, 39(1): 1-8.
[34] 熊飞, 李文朝, 潘继征. 高原深水湖泊抚仙湖大型底栖动物群落结构及多样性. 生物多样性, 2008, 16(3): 288-297.
[35] 卢金锁, 李志龙. 热分层对水库水质的季节性影响——以西安黑河水库为例. 湖泊科学, 2014, 26(5): 698-706.
[36] 王翠红, 辛晓芸, 李日强, 李海云, 李春宇, 徐建红. 钝顶螺旋藻的培养及其生物学特性的研究. 山西大学学报: 自然科学版, 2000, 23(1): 67-70.
[37] 秦海明, 王子牧, 胡旭仁. 中小型水库淡水鱼类生态养殖标准初探. 水产养殖, 2014, 35(11): 32-34.